

XXVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS

AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA CARGA HIDRÁULICA NA REMOÇÃO DE SÓLIDOS EM FILTROS LENTOS DE DUPLA CAMADA COM DIFERENTES TAXAS DE FILTRAÇÃO

Luana Adriano Rocha¹ ; Ana Clara Magalhães Carneiro² & Paulo de Castro Vieira³

Abstract: This study aimed to evaluate the influence of hydraulic loading on the performance of slow sand filters adapted with dual filtration layers for solids removal. The system was implemented as a simplified water treatment solution in the Chico Rei displaced persons camp in Ouro Preto, Minas Gerais, consisting of two parallel lines, each composed of dynamic pre-filters followed by slow filters adapted with dual media layers of sand and anthracite. Each slow sand filter was operated for 135 days under different hydraulic loading conditions, resulting in average applied loads of 40 cm and 120 cm. The hydraulic load was increased to reduce head losses in the filter media and consequently increase the filtration rate. Solids removal was evaluated through turbidity and apparent color analyses. Under these conditions, the filter with the lower hydraulic load showed an average turbidity of 1.66 NTU at the inlet and 1.25 NTU at the outlet, while the higher-load filter operated with 1.74 NTU at the inlet and 1.35 NTU at the outlet. For apparent color, the average values were 0.79 HU at the inlet and 0.63 HU at the outlet for the lower-load filter, and 1.06 HU at the inlet and 0.75 HU at the outlet for the higher-load filter. A preliminary data analysis, based on medians and percentile distributions from boxplots, indicated greater stability and performance in the filter operated under lower hydraulic load, with a 16.79% reduction in turbidity and absence of apparent color in most samples. The turbidity coefficient of variation was 40.0% for the lower-load filter compared to 54.9% for the higher-load filter, suggesting lower variability in this system. These findings indicate a direct influence of hydraulic loading on the efficiency and stability of the filtration process, reinforcing the importance of careful control in decentralized treatment contexts.

Resumo: Este estudo teve como objetivo avaliar a influência da carga hidráulica no desempenho de filtros lentos adaptados com dupla camada de filtração quanto à remoção de sólidos. O objeto de estudos foi implantado como uma solução simplificada de tratamento de água no acampamento de desabrigados Chico Rei, em Ouro Preto-MG, constituído por duas linhas paralelas compostas por pré-filtros dinâmicos seguidos de filtros lentos adaptados com dupla camada de filtração, areia e antracito. Cada filtro lento foi operado durante 135 dias com diferentes cargas hidráulicas, resultando em cargas hidráulicas médias aplicadas de 40 cm e 120 cm. A carga hidráulica foi elevada com o propósito de reduzir as perdas de carga do meio filtrante para elevar a taxa de filtração. Os sólidos foram aferidos pelas análises de turbidez e cor aparente. Para estas condições foram obtidos resultados de turbidez no filtro com menor carga aplicada, média de 1,66 uT, na

¹) Graduandas em Engenharia Urbana pela Universidade Federal de Ouro Preto – Ouro Preto (MG), Brasil, luana.adriano@aluno.ufop.edu.br

²) Graduandas em Engenharia Urbana pela Universidade Federal de Ouro Preto – Ouro Preto (MG), Brasil, ana.cmc@aluno.ufop.edu.br

³) Professor do Departamento de Engenharia Urbana da Escola de Minas e do Programa de Pós-graduação em Sustentabilidade Socioeconômica Ambiental- UFOP, paulovieira@ufop.edu.br

Endereço: Campus Morro do Cruzeiro, Bauxita, CEP: 35400-000, Ouro Preto (MG), Brasil, fone: (31) 3559-1163

entrada e de 1,25 uT, na saída, enquanto o filtro com maior carga operou com entrada de 1,74 uT e saída de 1,35 uT. Para cor aparente, os valores médios foram de 0,79 uH na entrada e 0,63 uH na saída do filtro com menor carga, e de 1,06 uH na entrada e 0,75 uH na saída do filtro com maior carga. A análise preliminar dos dados, baseada nas medianas e na distribuição dos percentis nos boxplots, indicou maior estabilidade e desempenho no filtro operado sob menor carga hidráulica, com redução de 16,79% na turbidez e ausência de cor aparente na maioria das amostras. O coeficiente de variação da turbidez foi de 40,0% no filtro de menor carga, comparado a 54,9% no de maior carga, sugerindo menor variabilidade dos resultados neste sistema indicando uma influência direta da carga hidráulica na eficiência e estabilidade do processo, reforçando a importância do seu controle criterioso em contextos de tratamento descentralizado.

Palavras-Chave: Filtro lento, Carga hidráulica e Remoção de Sólidos.

INTRODUÇÃO

A filtração lenta é uma tecnologia caracterizada por sua eficiência na remoção de sólidos suspensos e micro-organismos patogênicos. Esse processo opera por meio de processos físicos e biológicos, distinguindo-se das tecnologias convencionais por dispensar as etapas de coagulação, floculação e sedimentação, eliminando assim o uso de produtos químicos (HELLER; PADUA, 1999). Sua simplicidade construtiva, operação e manutenção tornam-na especialmente adequada para comunidades pequenas, bem como para soluções descentralizadas de tratamento de água. A carga hidráulica imposta aos filtros lentos, definida como a altura de água sobre o meio filtrante, influencia a taxa de filtração, na remoção de partículas e a longevidade operacional do sistema, carreiras de filtração (DI BERNARDO et al., 1999).

A eficiência do processo de filtração lenta, entretanto, é diretamente influenciada por variáveis hidráulicas de operação, como a taxa de filtração e a carga hidráulica. Estas condicionam o tempo de detenção da água no meio filtrante, o grau de colmatação e a estabilidade da camada biológica formada sobre o leito do filtro. Segundo a EPA (1991), cargas hidráulicas elevadas tendem a reduzir a eficiência de remoção de turbidez e coliformes devido à redução no tempo de contato, recomenda que as cargas hidráulicas em sistemas lentos sejam mantidas na faixa tradicional, entre 0,1 a 0,4 m/h.

A turbidez e a cor aparente são parâmetros amplamente utilizados como indicadores da qualidade da água, pois refletem a presença de sólidos suspensos e dissolvidos, os quais podem comprometer a eficácia da desinfecção e aumentar o risco de veiculação de doenças de origem hídrica. Segundo Di Bernardo (1999), esses contaminantes estão frequentemente associados à proteção de microrganismos patogênicos, sendo fatores de risco relevantes para a saúde pública, principalmente em contextos de vulnerabilidade. Nesse sentido, as taxas hidráulicas de operação desempenham papel crucial na qualidade da água tratada, uma vez que influenciam diretamente o tempo de detenção, a eficiência de remoção e a estabilidade dos mecanismos físico-biológicos dos filtros lentos. Taxas excessivamente elevadas podem comprometer o desempenho do sistema, resultando em menores eficiências de clarificação e, conseqüentemente, em água com características inadequadas para o consumo humano.

Neste contexto, este trabalho teve como objetivo avaliar a influência da carga hidráulica sobre o desempenho de filtros lentos de dupla camadas, integrantes de um sistema simplificado de tratamento de água do tipo Filtração em Múltiplas Etapas (FiME) seguida de desinfecção cloração,

instalado em uma comunidade em situação de vulnerabilidade socioambiental no município de Ouro Preto MG. Para avaliar o desempenho dos filtros quanto às diferentes condições operacionais impostas, relacionadas às cargas hidráulicas foram monitorados os parâmetros de qualidade de água turbidez e cor aparente.

MATERIAIS E MÉTODOS

O presente estudo foi realizado no acampamento Novo Taquaral (Chico Rei), localizado no bairro Saramenha, zona urbana do município de Ouro Preto, estado de Minas Gerais (Figura 1). O Acampamento Chico Rei é uma ocupação organizada pelo Movimento dos Trabalhadores Sem Teto (MTST) iniciado em janeiro de 2022. A iniciativa surgiu como resposta às necessidades habitacionais de famílias afetadas por eventos geotécnicos críticos, como deslizamentos de terra e recalques de solo, intensificados por fortes chuvas na região. O acampamento contava com cerca de 50 moradores durante o período de estudos deste trabalho. A imagem aérea do acampamento com a indicação do sistema de tratamento de água instalado é apresentada na Figura 1.

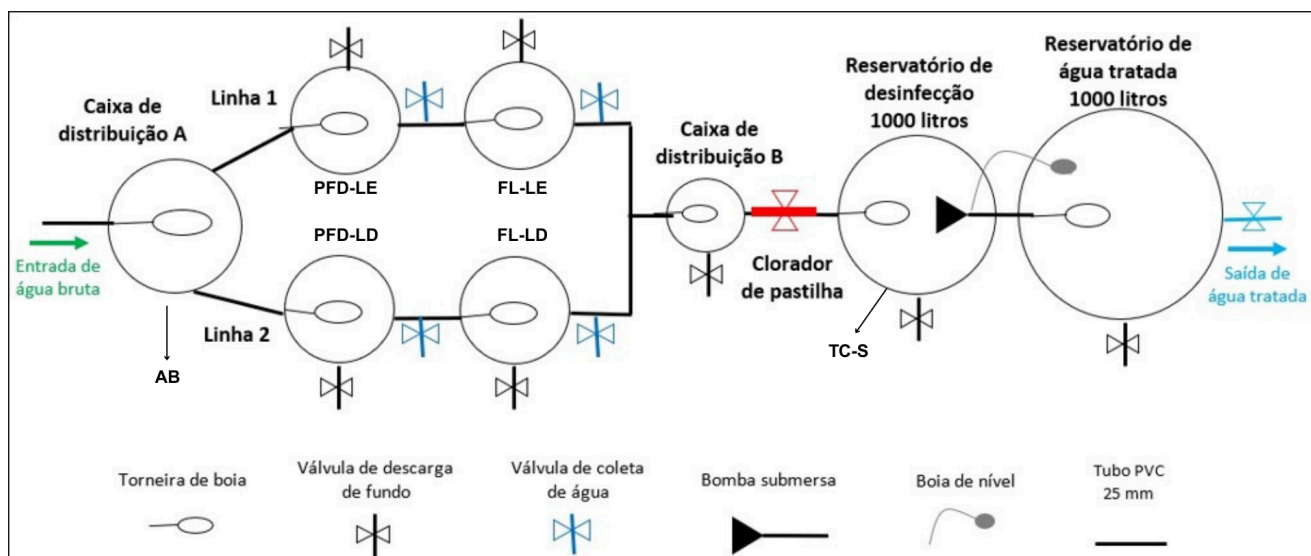
Figura 1 – Imagem de drone do local.



Fonte: Nogueira, 2023.

A partir da caracterização da qualidade de água do manancial utilizado pelos moradores do acampamento, foi implantado de forma participativa com os moradores em 2023 um sistema simplificado de tratamento de água do tipo Filtração em Múltiplas Etapas seguindo de desinfecção por cloração em pastilhas. A etapa de clarificação foi planejada com duas linhas paralelas, cada uma contendo um pré-filtro dinâmico (PFD), seguido de um filtro lento de dupla camadas (FL-DC). A unidade de desinfecção foi projetada com um clorador de pastilhas, instalado na tubulação antes da caixa de desinfecção. Nas Figuras 2 e 3 são apresentados o desenho esquemático das etapas de tratamento e uma fotografia do sistema de tratamento, respectivamente.

Figura 2 – Desenho esquemático das etapas de tratamento.



Legenda: AB: água bruta; TC-S: saída do tanque de contato de cloração (próximo à entrada da bomba); PFD-LE: pré-filtro dinâmico do lado esquerdo; PFD-LD: pré-filtro dinâmico do lado direito; FL-LE: filtro lento do lado esquerdo; FL-LD: filtro lento do lado direito. Fonte: Autora, 2025.

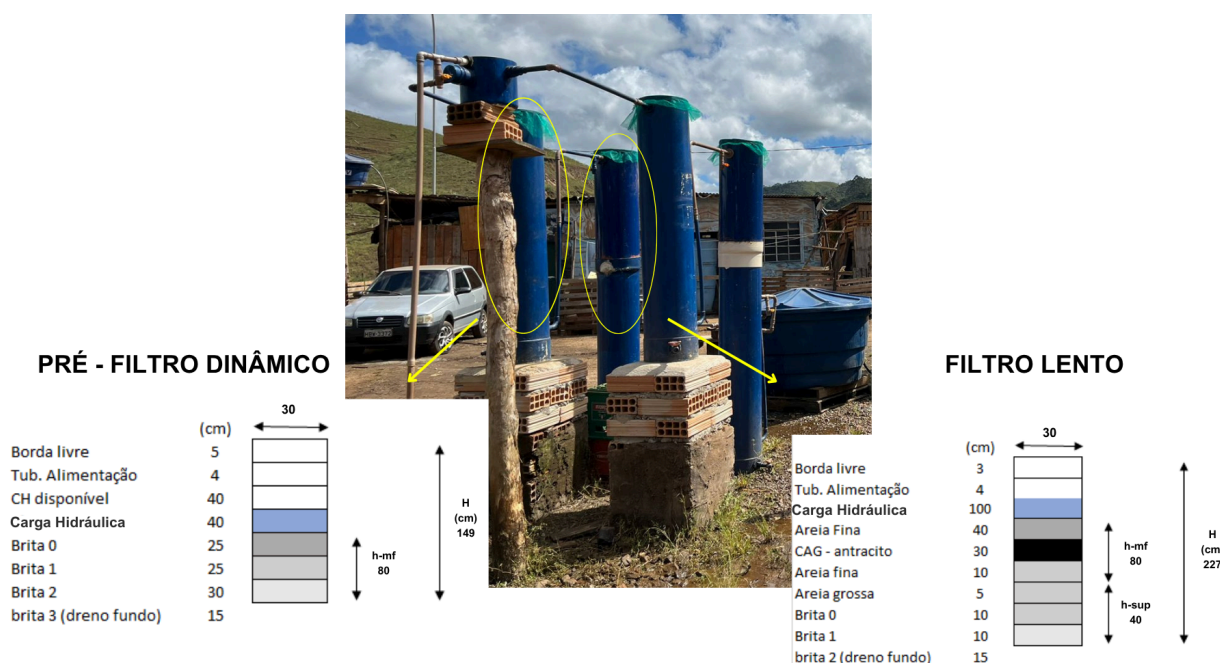
Figura 3 – Fotografia do sistema de tratamento de água implementado na ocupação Chico Rei.



Fonte: Autora, 2025.

As características das unidades de tratamento, bem como o processo de implantação do sistema foram descritos em trabalho apresentado por Vieira et al (2023). Serão destacados as configurações dos filtros lentos de dupla camadas (FL-DC) devido ser o objeto de estudo deste trabalho. Os filtros lentos de dupla camadas foram constituídos com camadas de meios filtrantes de areia fina e carvão antracito. O meio suporte foi constituído por pedrisco em diferentes granulometrias. Na Figura 4 é apresentada a configuração das camadas dos meios filtrantes e suportes dos FL-DC.

Figura 4 – Configuração das camadas dos meios filtrantes e suportes dos FL-DC.



Fonte: Autora, 2025.

O sistema foi operado continuamente por 136 dias, entre 15 de abril e 28 de agosto de 2024, sob diferentes condições de carga hidráulica, com o objetivo de avaliar o desempenho dos filtros lentos sob diferentes condições operacionais. O sistema operou com as duas linhas em paralelo sendo que o filtro lento da linha esquerda (FLDC-LE) foi submetido a uma carga hidráulica de 100 cm de, enquanto o filtro lento da linha direita (FLDC-LD) recebeu uma carga de 40 cm, respectivamente. Destaca-se que os filtros lentos foram projetados inicialmente para operar com carga hidráulica de 40 cm para altura total de 1,5 m em corpo de PVC OCRE 300 mm. Portanto, um dos FLs, o filtro lento da linha esquerda foi adaptado para elevar a carga hidráulica até 100 cm por meio de extensão do corpo externo construído em tubo PVC OCRE de 300 mm, alcançando altura total de 2,5 m.

Os filtros foram monitorados de duas a três vezes por semana por meio de coletas das amostras de água realizadas nos pontos de entrada e saída dos filtros de acordo com as diretrizes do Guia Nacional de Coleta e Preservação de Amostras elaborado pela CETESB e ANA (2012)s. Foram utilizados para acondicionamento das amostras em garrafas de polietileno, vedadas e quimicamente inertes. As amostras foram mantidas em bolsas térmicas e preservadas a 4 °C até a chegada ao laboratório. A análise dos parâmetros de turbidez e cor aparente seguiu os procedimentos descritos nas metodologias da APHA (2005), em laboratório, utilizando turbidímetro e colorímetro, respectivamente. A vazão dos filtros foi medida diariamente pelo método volumétrico,

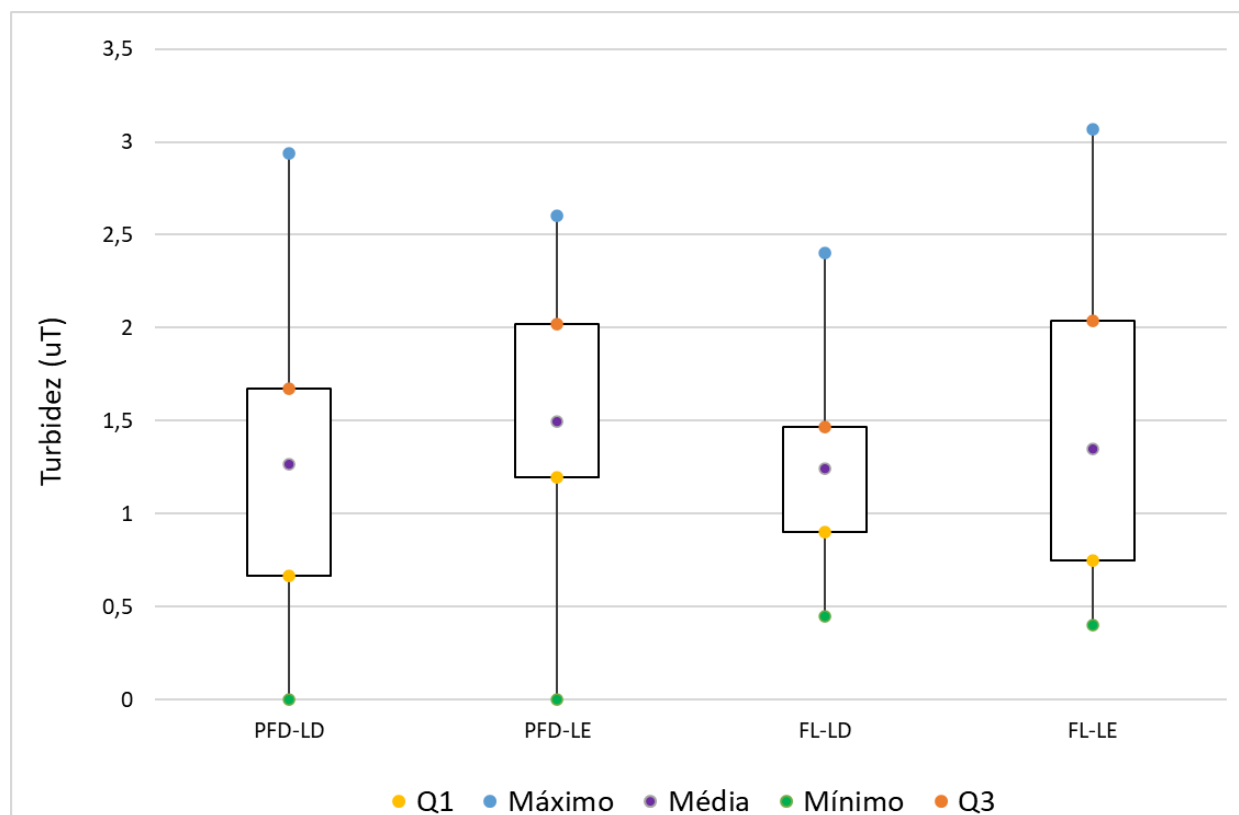
complementada por atividades rotineiras de manutenção, como reparo de tubulações, e limpeza das unidades.

Com o intuito de análise de tendências centrais, dispersões e possíveis variações no comportamento dos dados ao longo do período analisado, foram utilizadas análises estatísticas descritivas (valores mínimo e máximo, médias aritméticas, mediana, e os quartis inferior e superior; coeficiente de variação) representadas por gráficos boxplot e séries temporais.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Durante o período experimental (136 dias de operação), foram analisadas 33 amostras para cada um dos filtros lentos que foram operados sob duas condições distintas de carga hidráulica. O filtro FLDC-LE (maior carga) apresentou média de turbidez de 1,34 uT, enquanto o FLDC-LD (menor carga) operou com média de 1,24 uT. As taxas de aplicação médias operadas foram de 61,14 m/d no FLDC-LE e 14,2 m/d no FLDC-LD. A análise dos dados de turbidez, ilustrada na Figura 5, evidencia diferenças significativas no desempenho dos filtros. Os sistemas operando sob carga hidráulica reduzida (FLDC-LD) apresentaram valores médios de turbidez inferiores em comparação àqueles submetidos à carga elevada (FLDC-LE), tanto no pré-filtro dinâmico (PFD) quanto no filtro lento de dupla camada.

Figura 5 – Análise descritiva do parâmetro de turbidez (uT).



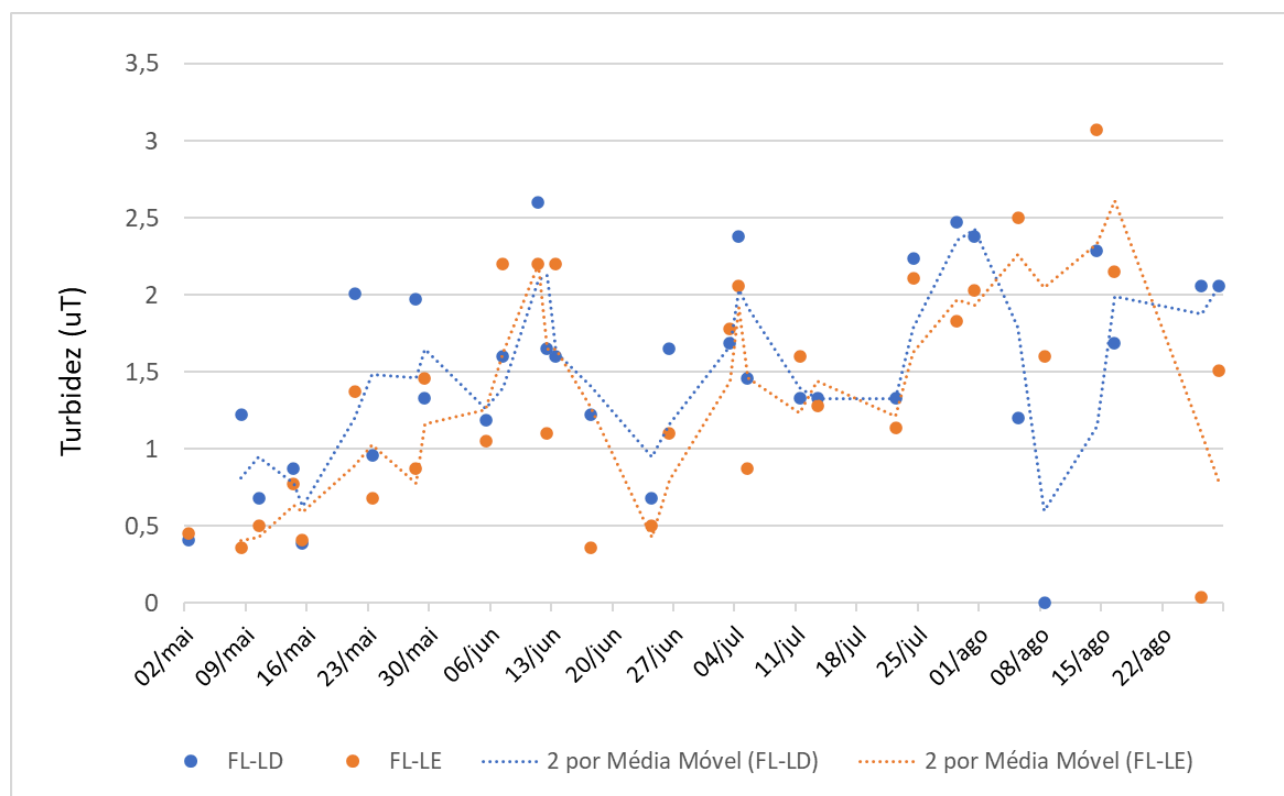
Legenda: PFD-LD: pré-filtro dinâmico do lado direito; PFD-LE: pré-filtro dinâmico do lado esquerdo; FL-LD: filtro lento do lado direito; FL-LE: filtro lento do lado esquerdo.

Fonte: Autora, 2025.

Observa-se que o FLDC-LD apresentou a menor mediana e menor amplitude interquartil, indicando maior estabilidade e eficiência na remoção de sólidos suspensos. Essa eficiência está associada ao maior tempo de detenção e ao uso mais efetivo dos mecanismos de filtração em profundidade, que permite a retenção progressiva de partículas ao longo do meio filtrante. Já o PFD-LE e o FLDC-LE mostraram maior variabilidade, possivelmente em razão da maior carga hidráulica aplicada, que reduz o tempo de contato e limita o aproveitamento do meio filtrante. Esses resultados reforçam a importância de taxas de filtração compatíveis com os mecanismos naturais de remoção, conforme descrito na literatura técnica.

Com base nas medianas, a eficiência de remoção da turbidez foi de 16,79% para o FLDC-LD e 13,40% para o FLDC-LE. O coeficiente de variação da turbidez foi de 40,0% e 54,9%, respectivamente, indicando maior estabilidade operacional no filtro submetido à menor carga hidráulica. A análise da série temporal de turbidez, apresentada na Figura 6, revela oscilações pontuais em ambos os sistemas, com picos mais acentuados observados no FLDC-LE, sugerindo maior variabilidade sob condições de carga elevada.

Figura 6 – Comportamento temporal da turbidez dos filtros FL-LD e FL-LE.



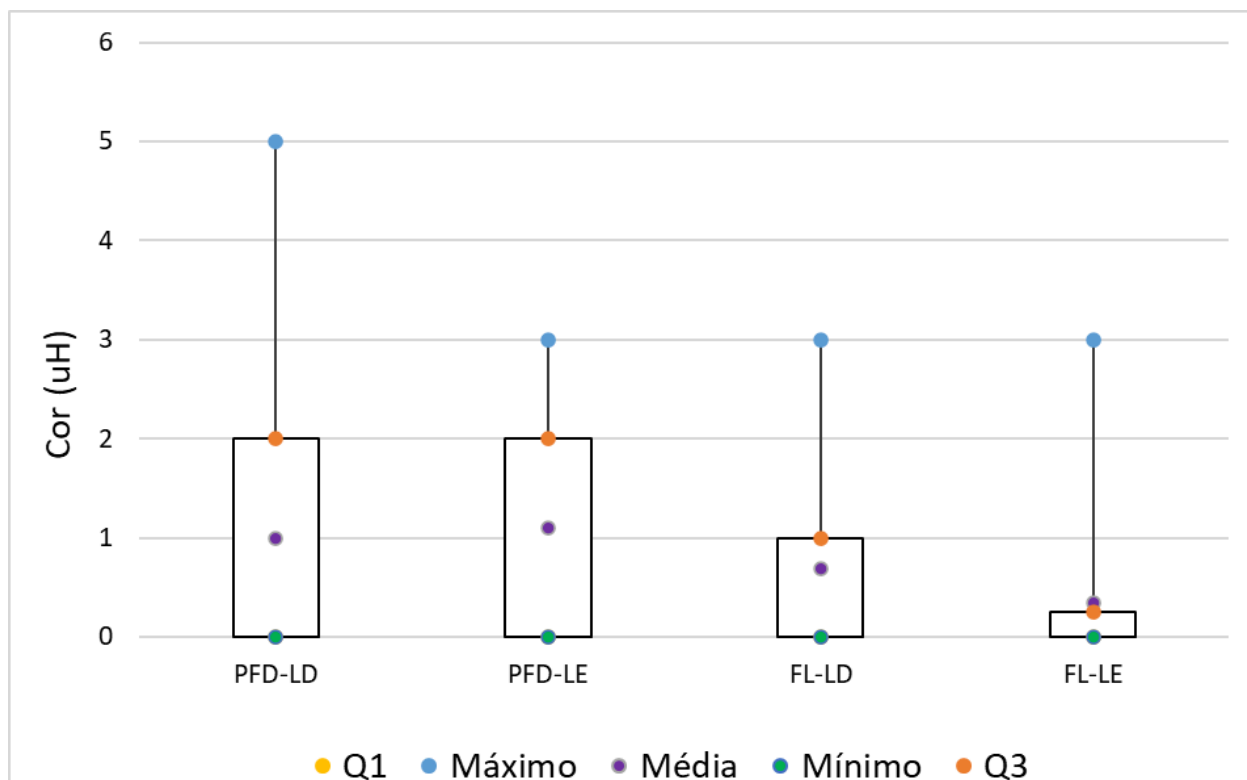
Legenda: FL-LD: filtro lento do lado direito; FL-LE: filtro lento do lado esquerdo.

Fonte: Autora, 2025.

Em relação ao parâmetro cor, a Figura 7 ilustra sua distribuição ao longo das unidades de tratamento. Os filtros lentos apresentaram médias próximas de zero, especialmente no FLDC-LE, onde os dados concentraram-se em faixas mais baixas. Ainda assim, os boxplots indicam maior

variabilidade na entrada do sistema, com valores máximos mais elevados nos pré-filtros, particularmente no PFD-LD (até 5 uH).

Figura 7 – Análise descritiva do parâmetro de Cor (uH).



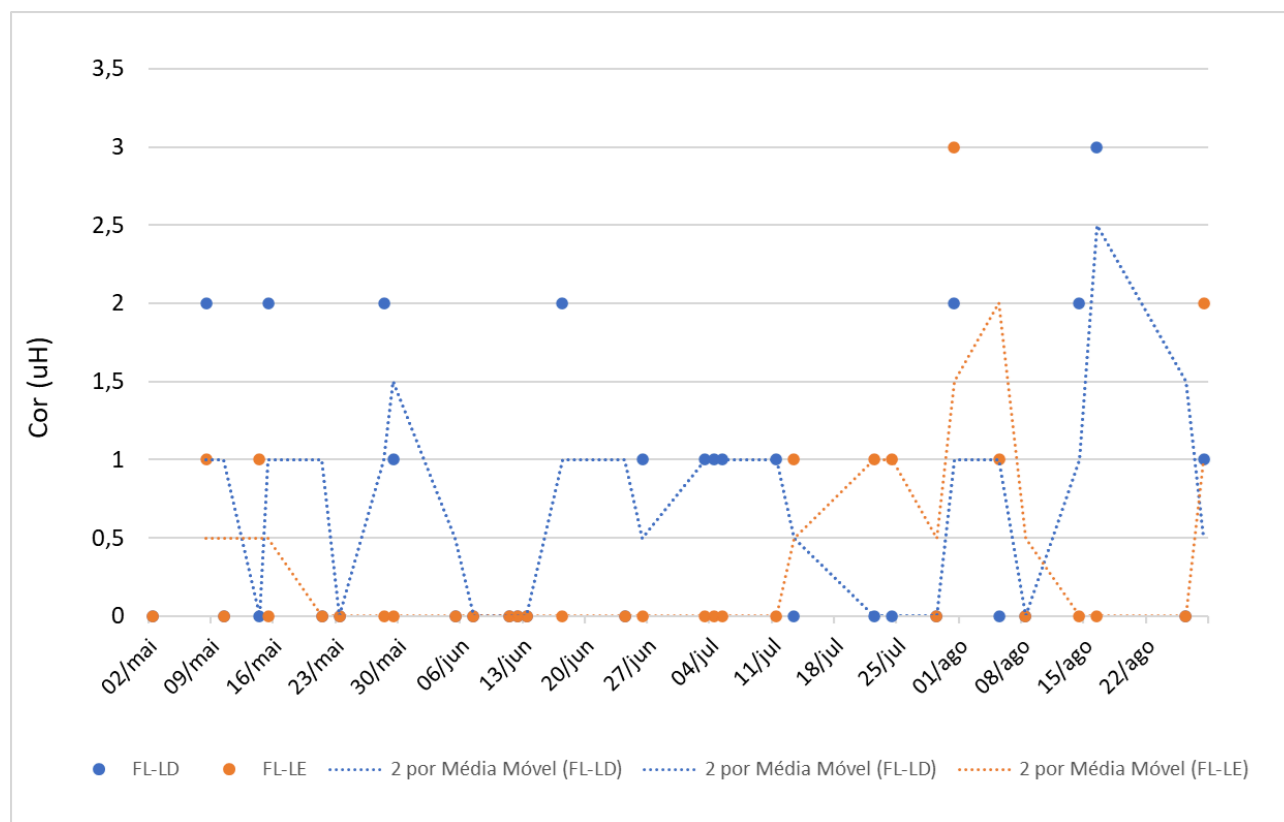
Legenda: PFD-LD: pré-filtro dinâmico do lado direito; PFD-LE: pré-filtro dinâmico do lado esquerdo; FL-LD: filtro lento do lado direito; FL-LE: filtro lento do lado esquerdo.

Fonte: Autora, 2025.

Embora a remoção da cor tenha sido efetiva, os coeficientes de variação foram elevados, sendo de 130,3% para o FLDC-LD e 203,8% para o FLDC-LE, indicando instabilidade no desempenho,

sobretudo sob alta carga, visto que os dados de cor aparente monitorados foram baixos, próximos da sensibilidade do método, o que dificulta a acuracidade dos dados. O FLDC-LE apresentou menor amplitude interquartil, mas picos mais pronunciados, sugerindo que a carga hidráulica mais elevada influenciou negativamente a uniformidade do processo. A série temporal da cor, apresentada na Figura 8, reforça esse comportamento.

Figura 8 - Comportamento temporal da cor dos filtros FL-LD e FL-LE.



Legenda: FL-LD: filtro lento do lado direito; FL-LE: filtro lento do lado esquerdo.

Fonte: Autora, 2025.

Para o parâmetro cor, o FLDC-LD obteve 31% de eficiência média de remoção, enquanto o FLDC-LE apresentou eficiência média de 78%. A maior eficiência de remoção de cor aparente no filtro operando com maior carga hidráulica pode ser explicada pela filtração de profundidade ocorrida na camada de carvão antracito.

Observa-se que os resultados de turbidez e cor obtidos em ambos os filtros lentos, durante o período de operação com distintas cargas hidráulicas foram inferiores aos padrões de potabilidade de 5 uT e 15 uT estabelecidos pela Portaria GM/MS nº 888/2021.

Em síntese, os dados evidenciam que o filtro operado com menor carga hidráulica (FLDC-LD) apresentou desempenho superior em termos de estabilidade e remoção de turbidez, com menores flutuações nos valores observados. Por outro lado, embora o FLDC-LE tenha atingido alta eficiência na remoção de cor, sua operação sob maior carga resultou em maior variabilidade. Esses achados ressaltam a importância do controle da carga hidráulica no desempenho de sistemas de filtração lenta em contextos descentralizados.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados obtidos permitiram avaliar, de forma clara e comparativa, a influência da carga hidráulica no desempenho de filtros lentos de dupla camada aplicados a contextos de saneamento

descentralizado. Foi observado que o filtro operado sob menor carga apresentou melhores indicadores de eficiência na remoção de turbidez, além de maior estabilidade operacional, evidenciada por coeficiente de variação inferior. Para o parâmetro cor, ambos os filtros demonstraram capacidade de remoção, ainda que com flutuações acentuadas em função da variabilidade das condições de entrada.

Esses resultados confirmam que a carga hidráulica é um fator crítico na eficiência dos sistemas de filtração lenta, especialmente em ambientes de operação simplificada e comunitária. Conclui-se que o controle rigoroso da carga pode contribuir para o aumento da eficiência do sistema e para a segurança microbiológica da água tratada. Recomenda-se, portanto, que futuras implantações desse tipo de sistema considerem cuidadosamente os parâmetros hidráulicos como elemento-chave do projeto.

REFERÊNCIAS

APHA. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 22 ed. Washington: American Public Health Association, 2012. 1496 p.

BRASIL. Ministério da Saúde. Fundação Nacional de Saúde. Manual de Saneamento. Fundação Nacional de Saúde. 4. ed. Brasília: Funasa, 2019.

BRASIL. Ministério da Saúde. Gabinete do Ministro. Portaria GM/MS no 888, de 4 de maio de 2021. Estabelece os procedimentos e responsabilidades relativos ao controle e à vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, n. 86, p. 78–79, 7 maio 2021.

DI BERNARDO, L.; DANTAS, Â. D. B. Métodos e Técnicas de Tratamento de Água. 2. ed. 2005.

DI BERNARDO, L.; BRANDÃO, C.C.S.; HELLER, L. Tratamento de Águas de Abastecimento por Filtração em Múltiplas Etapas. (Ed.) PROSAB-Programa de Pesquisa em Saneamento Básico. ABES–Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, Rio de Janeiro. 1999.

ONU. Resolução A/RES/64/292: O Direito Humano à Água e Saneamento. [online], 28 jul. 2010.

ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DE SAÚDE (OMS). Guidelines for drinking-water quality: fourth edition incorporating the first addendum. WHO Library Cataloguing-in-Publication Data. 2017.

VIEIRA, Paulo de Castro; TENORIO, Natasha Rodrigues Vitorino Carvalho; FÉLIX, Ana Luiza Silva Santos; SEIDL, Martin; BORGES, Vitória Queiroz. Sistema simplificado de tratamento de água em um acampamento de desabrigados em Ouro Preto – MG. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL – ABES, 32., 2023, Curitiba: ABES, 2023.